

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálového inženýrství

Stanovení nízkocyklové teplotní odolnosti keramických povlaků nanášených plazmou
Determination of low-cycle temperature resistance of ceramic coatings created by plasma
application

Student: Monika Zbránková
Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Zdeněk Jonšta , CSc.

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Monika Zbránková**

Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911R028 Diagnostika materiálů

Téma: Stanovení nízkocyklové teplotní odolnosti keramických povlaků
nanášených plazmou
Determination of Low-Cycle Temperature Resistance of Ceramic
Coatings created by Plasma Application

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor současného stavu
2. Materiály a plazmové technologie používané v leteckém průmyslu
3. Návrh metodologie zkoušek a geometrie vzorků
4. Výsledky a jejich diskuze
5. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

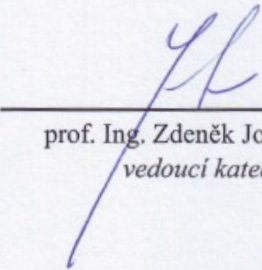
- [1] Suchánek, V. a kol.: Speciální technologie povrchových úprav, Praha, Fak. Strojní ČVUT, 1990
- [2] Proc. Vrstvy a povlaky 2003, Trenčín 2003.
- [3] Zinc Coatings-Microstructure of Various Zinc Coatings, American Galvanizers Association, Englewood, 2000.
- [4] Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection of Steel Products, American Galvanizers Association, Englewood, 2000.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

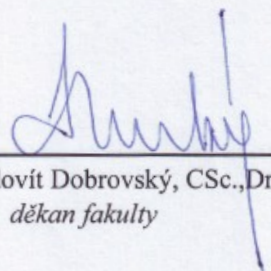
Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.**

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 25.05.2011


prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah BP |
| 2. Zásady pro vypracování BP | 6. Textová část BP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. *V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.*

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 7) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

- ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

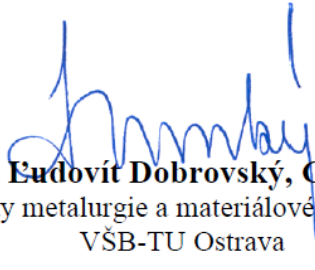
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.

Ostrava 30. 11. 2010


Prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ... 3.6.2011

Monika Zbraňková
.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt:

Keramické povlaky se v leteckém průmyslu nanášejí na žáruvzdorné a žáropevné materiály především z důvodu tepelné ochrany základního materiálu. Jedná se o součásti, jako jsou např. lopatky spalovacích motorů, vnitřní stěny spalovacích komor, usměrňovače proudu spalín vedoucích z motoru atd., které jsou dlouhodobě vystavené působení zvýšených teplot a zemské atmosféry.

Díky rozdílnému vysokoteplotnímu chování kovových základních materiálů a keramických povlaků se např. při konstrukci nových dílců, anebo při zavádění nových materiálů, musí provádět celá řada typizovaných i speciálních zkoušek k potvrzení jak vhodnosti použitých materiálů, resp. jejich kombinace, tak výběru technologie, kterou se bude povlak nanášet.

Typ TBC (Thermal Barrier Coating), kterému se věnuje tato práce je oxidový YZr povlak s koherentní kovovou bezoxidovou mezivrstvou na bázi NiCrAlY, nanášený plazmovým hořákem na superslitinu typu 54Ni22Cr12,5Co9Mo1,2Al.

Klíčová slova:

Nízkocyklová teplotní odolnost, keramické povlaky, superslitina, plazma, TBC.

Abstract:

In aerospace industry, ceramic coatings are applied on a high-temperature heat resistant materials mainly for the thermal protection of basic material. These are components, such as blades combustion engines, internal combustion chamber walls, or exhaust gas rectifiers from engine, which are long exposed to elevated temperatures and the Earth's atmosphere.

Due to the different high-temperature behavior of basic metal materials and ceramic coatings, a number of standardized and specialized tests has to be performed during construction of new parts or introduction of new materials. These tests are used not only to confirm the suitability of used materials and their combination, but also to choose technology how coating will be applied on basic material.

TBC (Thermal Barrier Coating), which this work is devoted to, is YZr oxide coating with a coherent metal non-oxide interlayer based on NiCrAlY, applied by plasma torch to superalloy of type 54Ni22Cr12,5Co9Mo1,2Al.

Keywords:

Low-cycle temperature resistance, ceramic coating, superalloy, plasma, TBC

Poděkování:

Děkuji tímto panu prof. Ing. Zdeňku Jonštovi, CSc., za vedení, doporučení a dozorování mé bakalářské práce a Ing. Jindřichu Ziegelheimovi, Ph.D., za velkou ochotu a pomoc při sestavování praktické části této práce a připomínky při její tvorbě a velmi děkuji svým prarodičům Janě a Miroslavu Mynářovým za podporu ve studiu při mém mateřství, svému partnerovi Bc. Jiřímu Helešici a všem mým blízkým, kteří mě jakkoliv podpořili v době mého studia vysoké školy.

OBSAH

ÚVOD	11
1 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA	12
1.1 Cíl práce	12
1.2 Hypotéza	12
2 TEORETICKÁ ČÁST	13
2.1 Původ a historie žárových nástřiků	13
2.2 Popis současného stavu – základní materiál a povlak	14
2.2.1 Používané materiály v leteckém průmyslu	14
2.2.2 Charakter a vlastnosti povlaků	14
2.2.3 Plazmatický nástřik se stíněním (shrouded)	14
2.2.4 Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu	15
2.2.5 Typy povlaků a jejich aplikace	16
2.2.6 Povlaky odolávající opotřebení	16
2.2.7 Povlaky odolávající korozi a oxidaci	17
2.2.8 Těsnící povlaky	18
2.3 Popis plazmové technologie	18
2.3.1 Struktura žárového nástřiku	18
2.3.2 Plazmový nástřik	21
2.4 Používané typy zkoušek nanesených povlaků	25
3 METODIKA	27
4 PRAKTICKÁ ČÁST - VÝSLEDKY	28
4.1 Doba ohřevu vzorku	28
4.2 Návrh metodologie zkoušek a odůvodnění	28
4.3 Prezentace naměřených výsledků	29

5. DISKUZE	30
6 ZÁVĚR	33
7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	34
8 KLÍČOVÁ SLOVA	35
9 SEZNAM ZKRATEK	36
10 PŘÍLOHY	37

ÚVOD

Vývoj civilizace přinesl v průběhu posledního století obrovský rozmach rozvoje v oblasti techniky a přírodních věd. V důsledku rozvoje strojírenství a jeho technologií došlo k velkému nárůstu požadavků na kvalitu jednotlivých dílů strojních zařízení a tím i kvality jejich povrchů, technologických vlastností a používaných materiálů. Bakalářská práce se zabývá stanovením nízkocyklové teplotní odolnosti keramických povlaků nanášených plazmou. V práci je zmapován současný stav problematiky v této oblasti s popisy plazmové technologie, popisem materiálů a povlaků používaných v leteckém průmyslu. Cílem této práce je snaha o stanovení mezní odolnosti keramického povlaku při namáhání tepelným šokem. Závěr práce je zaměřen na diskuzi k danému tématu a vyhodnocení výsledků práce.

1 CÍL PRÁCE A HYPOTÉZA

1.1 Cíl práce

Cílem práce je prakticky odzkoušet odolnost proti tepelnému šoku u vzorku s naneseným TBC (Thermal Barrier Coatings, dále jen TBC) povlakem a popsat jejich vizuální změny a případně stanovit mezní počet cyklů, který způsobí porušení soudržnosti TBC povlaku se základním materiálem.

Práce vzniká v úzké spolupráci s jejím zadavatelem Honeywell Aerospace Olomouc a.s., který blíže specifikuje podmínky zkoušek (teploty, dobu prohřevu, chladicí medium, požadovaný počet cyklů apod.), a definuje základní materiál i materiál TBC.

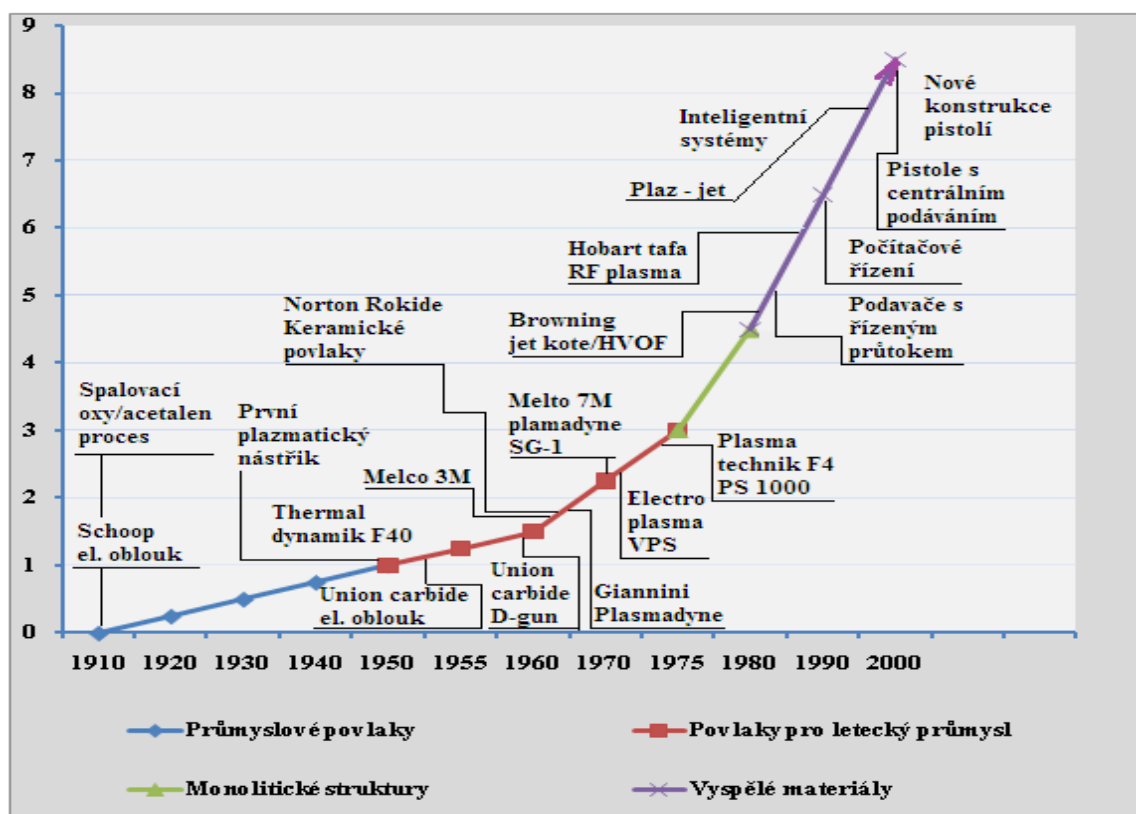
1.2 Hypotéza

Součástí z definovaného materiálu budou opatřeny plazmovým nástřikem. Chemické složení plazmového nástřiku (TBC) odpovídá typickému složení YSZ. TBC dále splňuje požadavky na velikost porezity podle zadavatele Honeywell Aerospace Olomouc a.s. Takto vzniklý povlak TBC se bude testovat v předepsaných rozmezích teplot a chladit v definovaném médiu. Tím se vyvolá tepelný šok, který ve svém důsledku působí negativně na celistvost TBC povlaku a jeho přilnavosti k základnímu materiálu z důvodu generování vnitřních pnutí. Úkolem je potvrdit, že po odzkoušeném počtu cyklů nedojde k porušení povlaku a je zajištěna jeho kvalita, podle předpisu zadavatele.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Původ a historie žárových nástřiků

Původ žárových nástřiků se datuje na počátek 20. století, kdy byl v roce 1917 patentován Shoopův vynález metalizace. Původně byl tento proces používán především pro nástřik zinku jako protikorozi ochrany povrchů, teprve později i pro nástřik tvrdých kovů. Ve čtyřicátých letech došlo k rozvoji plazmatického nástřiku, což umožnilo vytváření povlaků i z hůře tavitelných materiálů. Po objevu detonačního nástřiku v 50. letech se tyto technologie rozšířily i do dalších oblastí průmyslu, zejména do průmyslu leteckého. Vědecké studie, zabývající se podstatou procesu nástřiku, se však začaly objevovat až v průběhu 60. let. Během 70. let se objevuje též vakuový plazmatický nástřik. V posledních dvou desetiletích se žárové nástřiky staly nedílnou součástí mnoha průmyslových odvětví. Vynález HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) nástřiku v 80. letech byl dalším z kroků ve vývoji těchto progresivních technologií. Tento výrazný rozvoj nastal díky zavedení nových konstrukcí hořáků, zlepšení kontroly celého procesu, zavedení nových způsobů přípravy přídavných materiálů a používání nových moderních technik zajišťujících reprodukovatelnou tvorbu povlaků.[4]



Graf 1. Časová přímka vývoje technologií, zařízení a materiálů pro žárový nástřik.

2.2 Popis současného stavu - základní materiál a povlak

2.2.1 Používané materiály v leteckém průmyslu

Vysoká teplota plazmatu umožňuje použití této technologie pro nástřik prakticky všech materiálů, které jsou stabilní až do teploty tavení. Je vhodná pro nástřik kovů, většiny keramik a cermetů. Vysoká teplota však může být v některých případech (např. u cermetů) nevýhodou, protože může způsobit oxidaci, změnu fázového složení nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku.

2.2.2 Charakter a vlastnosti povlaků:

Vysoká teplota a rychlost dopadajících částic vedou ke vzniku povlaku s velmi jemnou a hustou strukturou a s vysokou adhezí k základnímu materiálu. Obsah oxidických částic závisí na technologii nástřiku termicky stříkaných oxidových povlaků – při APS (Atmospheric Plasma Spraying, dále jen APS) nástřiku dochází k míšení inertního plazmového plynu s plyny v atmosféře (N_2 , N_2), které mohou s letícími natavenými částicemi reagovat a vytvářet oxidické nebo jiné vměstky ve struktuře povlaku.

Širší a delší plazmový proud umožňuje prodloužení depoziční vzdálenosti (např. u slitin $Mg-Al$, kde kovem může být Ni, Co nebo Fe je depoziční vzdálenost při APS nástřiku volena v rozmezí 75 – 100 mm, zatímco při VPS nástřiku může přesáhnout až 400 mm) a vede k rozšíření a větší rovnoměrnosti stopy po nástřiku (> 50 mm při depoziční vzdálenosti 300 mm ve srovnání se stopou APS nástřiku: < 10 mm při 75 mm depoziční vzdálenosti) Širší a rovnoměrnější stopa po nástřiku má za následek homogennější a kvalitnější povlak.

2.2.3 Plazmatický nástřik se stíněním (shrouded)

V tomto případě je ke snížení obsahu oxidů ve struktuře a zlepšení hustoty povlaku použito stínění proudu plazmatu inertním plynem, obvykle argonem nebo dusíkem. Omezení přístupu kyslíku do proudu plazmatu a jeho nahrazení Ar vede kromě snížení výskytu oxidů také k vyšší teplotě a prodloužení proudu plazmatu, což má za následek vyšší protavení částic prášku.

2.2.4 Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu

Technologie žárového nástřiku patří mezi progresivní technologie povrchových úprav, které umožňují vytvářet funkční povrchy se specifickými vlastnostmi. Vzhledem k jejich flexibilitě a technologickým možnostem postupně vytlačily galvanické procesy jako hlavní způsob povrchových úprav pro výrobu i renovace leteckých turbínových motorů, ale také draků letadel, zejména podvozkových částí.

Rozvoj technologií žárového nástřiku a zvýšené požadavky na konstrukci a provozní spolehlivost leteckých turbínových motorů vedly v posledním období k mohutnému využití nástřiků na celou řadu exponovaných dílů. Zejména technologie plazmového nástřiku a technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem (HVOF) se v provozu osvědčily do takové míry, že dnes patří k nejdůležitějším technologiím povrchových úprav a nelze si představit výrobu a renovace turbínových motorů novější generace (po roce 1970) bez jejich intenzivního využití.[9]

V leteckém průmyslu jsou používány následující technologie žárového nástřiku:

Plazmový nástřik

Výhodami této technologie jsou její flexibilita a výborné výsledné vlastnosti povlaků. Dále pak pro tuto technologii hovoří nejmenší tepelné ovlivnění substrátu. Nepříznivá je značná technologická náročnost a vysoká cena.

Vysokorychlostní nástřik plamenem

Přednostmi jsou lepší vlastnosti kovů a karbidů než u plazmového nástřiku a vyšší produktivita. Nevýhodou jsou tepelné ovlivnění základního materiálu a vysoká cena.

Nástřik plamenem

Tato technologie je jednoduchá a méně cenově náročná, povlak má však o něco horší vlastnosti.

Nástřik elektrickým obloukem

Pro tuto technologii hovoří její nízké provozní náklady, jednoduchost a nízká cena.

Technologie	HVOF	Plasma	El. oblouk	Plamen
Forma materiálu	prášek	prášek	drát	prášek/drát
Teplota plamene [°C]	~3000	~ 5000-25000	~ 3000-6000	~ 2700-3000
Rychlost částic [m/s]	~ 400-800	~ 80-300	~ 50-150	~ 80-100
Typické materiály	kovy, slitiny, cermety	keramika	kovy, slitiny, cerme- ty (trub. dráty)	kovy, slitiny, plasty
Vlastnosti povlaku	velká hustota, výborná adhe- ze, tlakové pnutí	porézní v případě keramik	větší tloušťka, vyso- ká hustota	vyšší porezita a obsah oxidů
Vhodné aplikace	ochrana proti opotřebení, korozi	tepelné bariéry, izolátory	otěruvzdorné po- vlaky, renovace	klasická metalizace, méně náročné aplika- ce

Tabulka č. 1. Základní charakteristiky technologií žárových nástřiků.[4]

2.2.5 Typy povlaků a jejich aplikace

Nejčastěji se vyskytující stříkané vrstvy lze zařadit do několika charakteristických skupin. Pro každou z těchto skupin povlaků existují typické aplikace, rovněž zvolená technologie nástřiku je ustálená. Stříkané vrstvy lze tedy rozdělit do následujících skupin:

2.2.6 Povlaky odolávající opotřebení

V poslední době se tyto povlaky uplatňují jako náhrady chromu, používají se pro renovaci úložných prostorů ložisek nebo všude tam, kde je výhodou vysoká tvrdost povlaku a odolnost proti abrazi, erozi, adhezi i kavitaci. Tyto povlaky lze dále rozdělit na:

- Karbidické povlaky typu Cr_3C_2 - odolávají vysokoteplotnímu opotřebení nad $500\text{ }^\circ\text{C}$, používají se na vnější části spalovacích komor, vystavené kontaktnímu namáhání, popř. erozi, lze je aplikovat plazmou nebo HVOF.

- Kovokeramické povlaky (cermety) typu WC-Co - odolávají opotřebení, vhodné pro nejrůznější pouzdra pro uložení ložisek na hřídelích rotorů, popř. hřídelí vrtulníkových reduktorů, vhodné pro nárazníky kompresorových lopatek atd., nástřik se provádí dnes již téměř výhradně technologií HVOF.
- Keramické povlaky, nejčastěji Cr_2O_3 (kluzné dvojice).
- Povlaky ze speciálních slitin na bázi vysokolegovaných ocelí, Ni a Co-slitin, které mají velmi široké použití a lze je nanášet plazmou, HVOF technologií i elektrickým obloukem.[1]

2.2.7 Povlaky odolávající korozi a oxidaci

Jejich využití spočívá v nanášení materiálů s vysokou korozní odolností pro dané prostředí na materiál součástí s menší odolností, což sleduje ekonomické úspory (není nutno použít drahý materiál na celou součást) nebo další zvýšení funkčních parametrů, umožňující použití součástí za vyšších teplot. Do této skupiny patří tyto povlaky:

- Dvoustupňové povlaky typu TBC (thermal barrier coatings), složené z vazné vrstvy typu MCrAlY (NiCrAlY, NiCoCrAlY, CoCrAlY) pro zvýšení odolnosti proti vysokoteplotní korozi, která zajišťuje výbornou přilnavost k substrátu, a keramické vrstvy $\text{ZrO}_2 + 8\%\text{Y}_2\text{O}_3$ (YSZ)- zirkoniová keramika ZrO_2 stabilizovaná pomocí Y_2O_3 , která působí jako tepelná a difuzní bariéra - vhodné pro lopatky turbín, spalovací komory, plamence, difuzory, součásti výstupního systému, klapky trysek - tyto vrstvy se nanášejí výhradně plazmovým nástřikem.[7]
- Speciální slitiny na bázi Ni a Co zvyšující odolnost proti korozi v prostředí spalin s obsahem Na_2SO_4 a V_2O_5 - nástřik elektrickým obloukem, HVOF a plazmou.
- Slitiny Cu a Al pro zvýšení odolnosti proti elektrochemické korozi (voda, mořská voda, chemická činidla) a atmosférické korozi, nástřik elektrickým obloukem a plazmou.[1]

2.2.8 Těsnicí povlaky

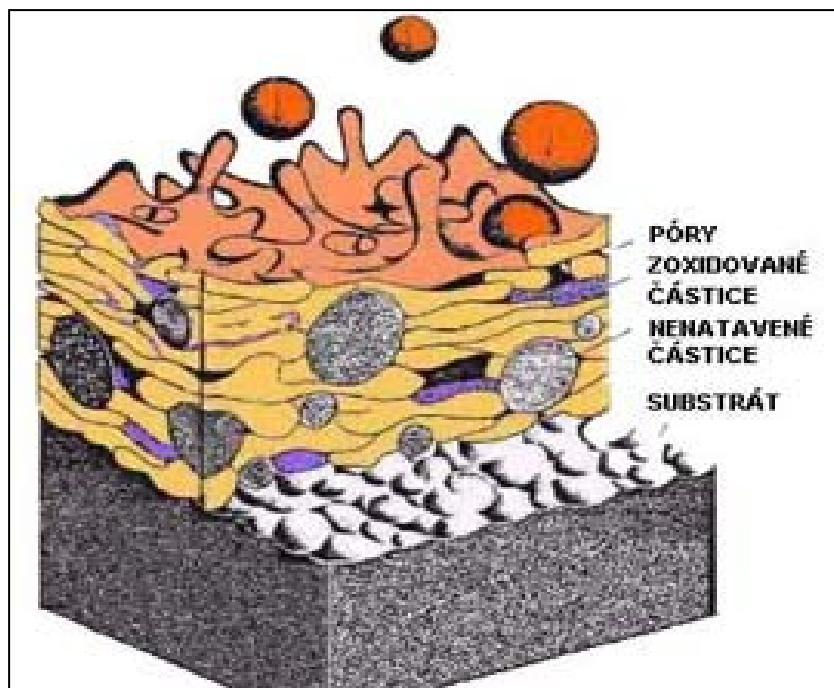
Pro utěsnění rotujících částí turbínových motorů, kompresorů, dmychadel, turbín a jiných rotačních zařízení, zvyšující termodynamickou účinnost motoru. Jedná se o tzv. obrusitelné výstelky (abradable sealings). Do této skupiny patří hlavně:

- obrusitelné nikl-grafitové výstelky do teplot 480 °C (výjimečně až 815 °C) pro použití na kompresorových částech (labyrinty);
- výstelky typu AlSi + polyester, popř. Al-bronz + polyester do 650 °C (kompresory);
- vysokoteplotní výstelky na bázi NiCoCrAlY + polyester + bornitrid do 700 °C pro utěsnění částí turbín.[1]

2.3 Popis plazmové technologie

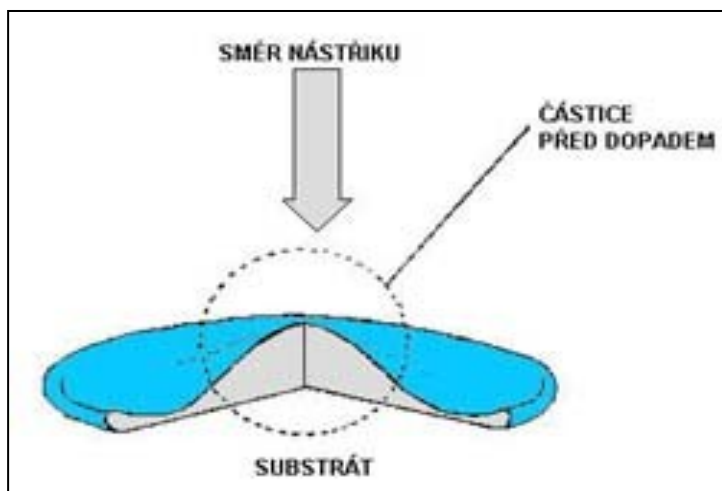
2.3.1 Struktura žárového nástřiku

Díky principu technologie žárového nástřiku má povlak lamelární strukturu (**Obr. 1**), tvořenou jednotlivými deformovanými částicemi-tzv. splat (**Obr. 2**), nenatavenými nebo jen částečně natavenými částicemi, póry a oxidickými částmi



Obr. č. 1. Schéma struktury žárového nástřiku.[8]

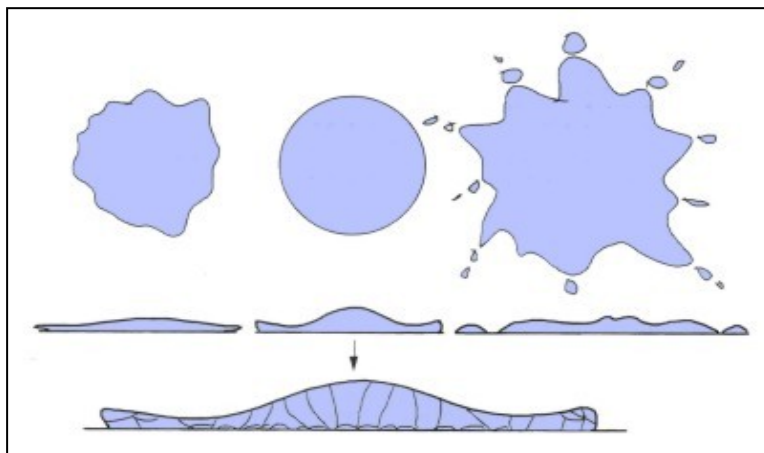
Základní "stavební jednotkou" povlaku je deformovaná částice, tzv. **splat**. Ideální splat má tvar disku.



Obr. č. 2. Částice během dopadu a vznik splatu[8]

Vysoká rychlost ochlazování částice po dopadu na substrát vede ke krystalizaci velmi jemných zrn a zabraňuje segregaci rovnovážných fází. Kromě oxidů, vzniklých na povrchu horké částice během letu na substrát, je rozložení prvků ve struktuře povlaku velmi homogenní, odpovídající rozložení v původním materiálu.

Oxidické vměstky v kovových povlacích jsou na struktuře příčného řezu povlakem rozpoznatelné jako podlouhlé, tmavé útvary. Vznikají buď interakcí letící horké částice s okolní atmosférou, nebo na povrchu povlaku vlivem vysoké teploty. V případě oxidace povrchu letící částice má na množství oxidů ve struktuře povlaku vliv teplota částice a doba letu. Po dopadu na substrát je oxidická obálka deformována spolu s částicí.[8]



Obr. č. 3. Možné tvary splatů.[4]

Přítomnost oxidů ve struktuře zvyšuje tvrdost povlaku, avšak jejich větší obsah způsobuje zvýšení křehkosti. Koncentrace oxidů na jednom místě může též vest ke snížení kohezní pevnosti povlaku. Obecně je množství oxidů ve struktuře kovových povlaků považováno za jeden z faktorů charakterizujících kvalitu povlaku.

Obsah oxidů ve struktuře kovových povlaků může být snížen pomocí:

- Zabráněním interakce s kyslíkem nástřikem v ochranné atmosféře inertních plynů nebo použitím VPS nástřiku
- Snížením teploty částic pomocí omezení tepelné kapacity plamene
- Zkrácením doby setrvání částice v plameni snížením depoziční vzdálenosti
- Snížením teploty povrchu nástřiku
- Použitím vhodnější velikosti částic prášku

Dalším sledovaným ukazatelem kvality povlaku je porezita. Vysoký obsah pórů ve struktuře povlaků bývá spojen s nízkou kohezí povlaků a vysokým počtem nenatavených nebo špatně natavených částic, což způsobuje praskání a odlupování povlaku. Navíc míra porezity přesahující 10 % může tvořit průchozí kanály pro korozi či oxidaci základního materiálu. Přítomnost pórů ve struktuře snižuje tvrdost povlaku a zhoršuje kvalitu jeho povrchu, tedy vlastností důležitých zejména u povlaků odolných proti opotřebení.

U celé řady aplikací je nutné typicky drsný povrch povlaku po nástřiku obrábět na požadovanou kvalitu. Vysoká míra porezity, která je příčinou přítomnosti různých povrchových nehomogenit, důlků atp., neumožňuje dosažení zrcadlově lesklého povrchu, nutného např. u ložiskových uložení.

V některých případech je však vysoký obsah pórů ve struktuře povlaku záměrem. Při nástřiku samomazných výstelek ložisek jsou depoziční parametry procesu záměrně voleny tak, aby míra porezity dosahovala 10-30%. Při běhu zařízení je do pórů infiltrován lubrikant. Také v případě povlaků tepelných bariér (TBC povlaky), které tvoří po otěruvzdorných a korozivzdorných povlacích třetí největší skupinu aplikací, je část jejich schopnosti tepelně izolovat zajištěna vysokou mírou porezity. [4]

2.3.2 Plazmový nástřik

Existuje řada různých metod plazmového nástřiku, běžně se však používají dva postupy nástřiku, tj. atmosférický plazmový nástřik - (APS) a proces vysokorychlostního kyslíkového paliva- (HVOF).



Obr. č. 4. Proces plazmového nástřiku. [6]

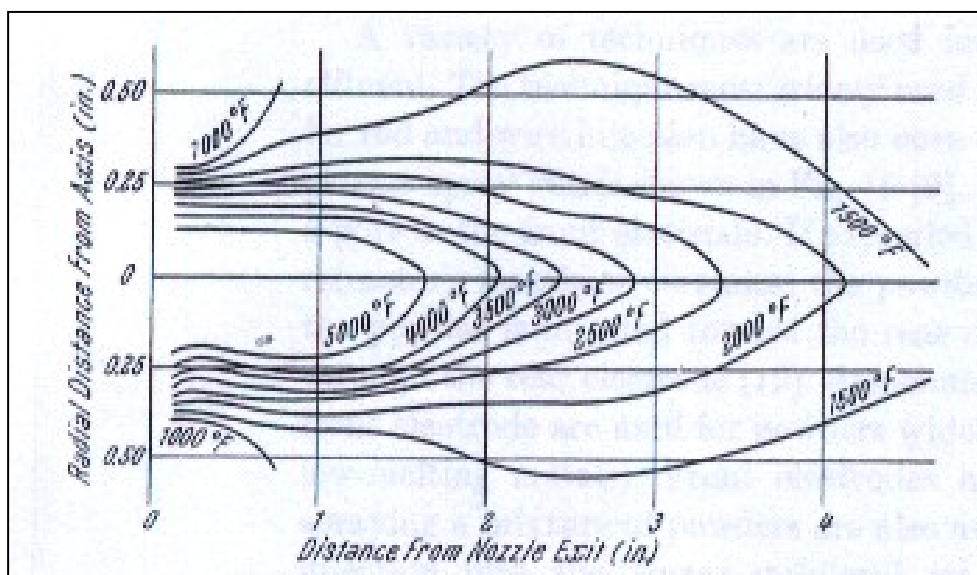
Při metodách APS a HVOF je nástřikový prášek, suspendovaný v nosném plynu, injektován do tepelného zdroje hořáku. Po částečném nebo úplném roztavení a urychlení se nárazy částic prášku na podklad vytváří povlak. Povrch podkladu se během procesu netaví.

U metody APS slouží plazma jako energetický zdroj, elektrický obloukový výboj mezi vodou chlazenou anodou a katodou disociuje a ionizuje pracovní plyn a vzniká plazma, které expanduje do atmosféry a vytváří plazmový plyn

Metoda HVOF používá kapalná paliva nebo palivové plyny k vysokoenergetickému spalování kyslíku ve spalovací komoře. Následná relaxace a akcelerace spalovaného plynu v expanzní trysce vede na výstupu trysky k nadzvukovým rychlostem pohybujícího se plynu. Prášek se injektuje buď do spalovací komory, nebo do výstupu z trysky.

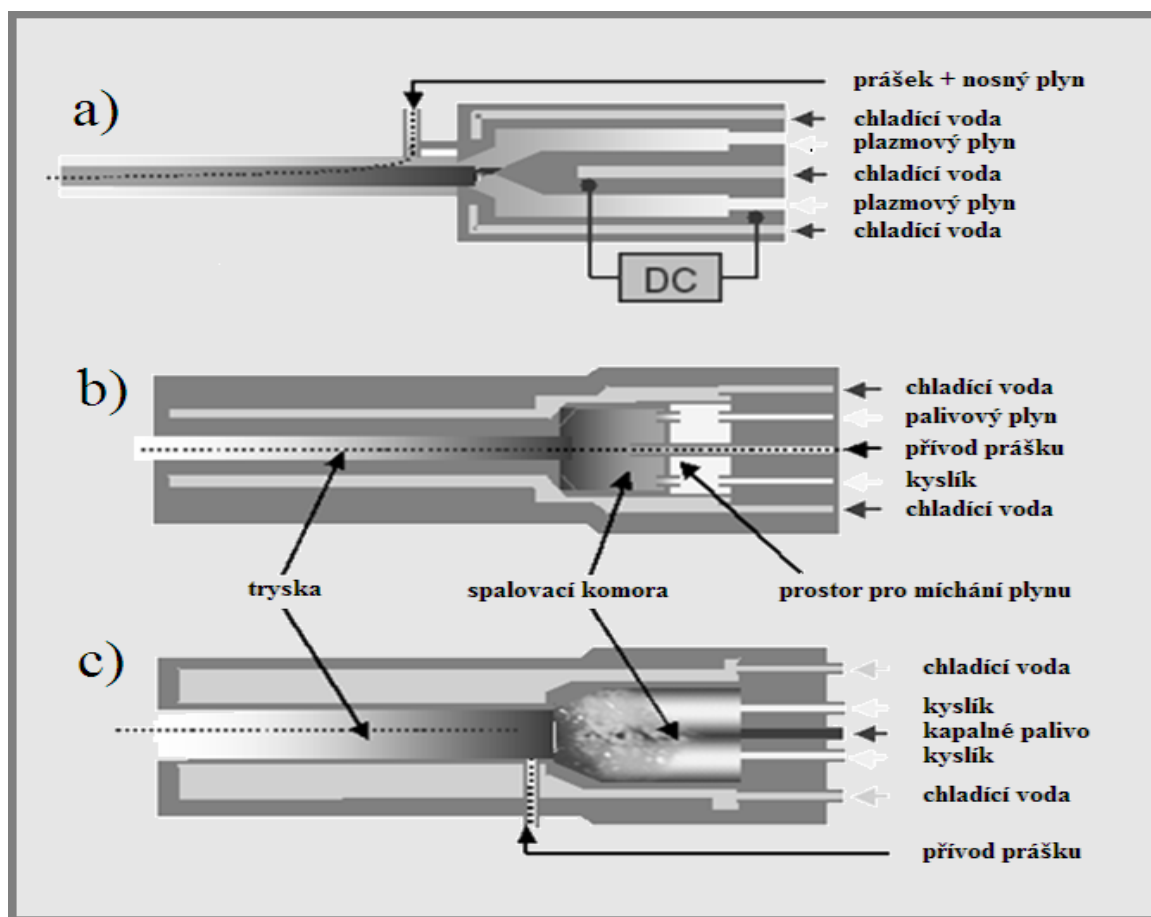
Při plazmatickém nástřiku hoří elektrický oblouk mezi vodou chlazenou wolframovou katodou a válcovou měděnou anodou, tvořící zároveň trysku plazmového hořáku. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu (obvykle argonu nebo jiném plynu s několika procenty plynu zvyšujícího entalpii plazmatu, např. H₂, He, N₂). Plazmový plyn je napouštěn axiálně do hořáku, na jehož druhém konci vystupuje plazma s vysokou teplotou (až 20 000 K)

a do něj se pomocí nosného plynu přivádí nanášený materiál ve formě prášku. Touto metodou je možné díky vysoké teplotě plazmatu nanášet různé druhy materiálů od čistých kovů až po těžce tavitelné materiály (např. keramiky). Vysoká teplota plazmatu je v některých případech nevýhodou, protože může způsobit oxidaci, změnu fázového složení nebo vyhořívání některých prvků nanášeného materiálu v průběhu nástřiku. Vlastnosti takto vytvořeného povlaku se poté mohou výrazně lišit od předpokládaných. Pro dosažení extrémně vysoké hustoty, přilnavosti a čistoty povlaků je možné provádět plazmatický nástřik v uzavřené komoře za sníženého tlaku (obvykle 0,005-0,02 MPa), tzv. VPS (vacuum plasma spraying) nebo LPPS (low pressure plasma spraying). [1]



Obr. č. 5. Rozložení teplot plazmatu na výstupu z trysky. [2]

Konstrukce zařízení pro plazmatický nástřik se vzájemně liší tvarem a velikostí elektrody, materiály zařízení či způsobem chlazení. Různé konstrukce plazmových hořáků umožňují jak dosahovat různých rozsahů průtoku plynů a množství vnesené energie, tak i používat různé typy vstupu přídavného prášku do plazmového hořáku (viz obr. 4). [2]



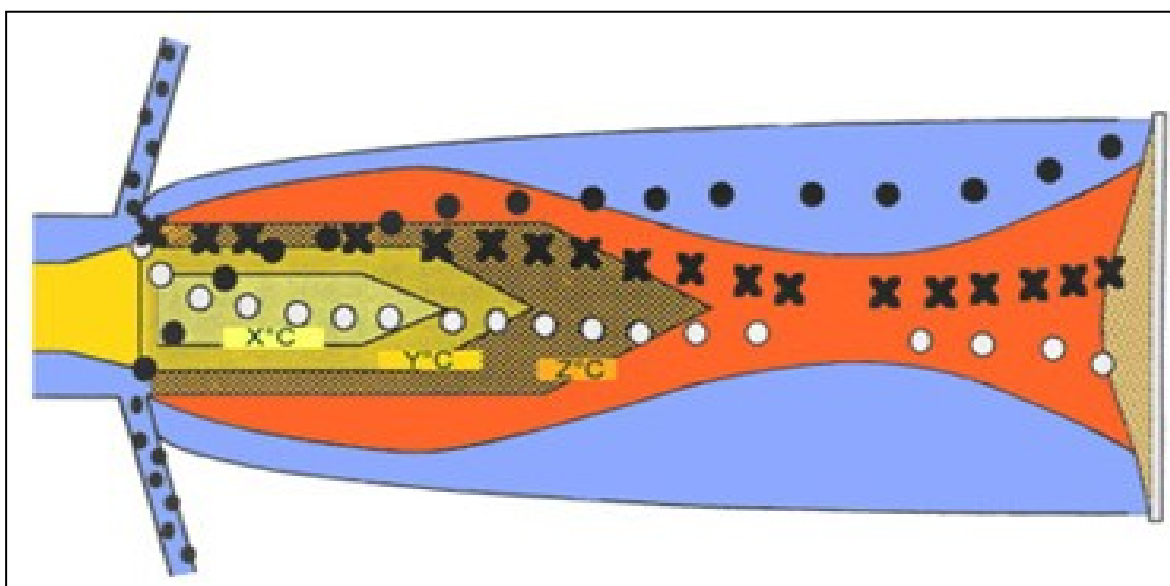
Obr. č. 6. (a) Schéma hořáku atmosférického plazmového nástřiku s axiálním přívodem prášku. Schémata hořáků HVOF používaných pro termické nástřiky.
 (b) Typ druhé generace pracující s difuzním plamenem, krátkou spalovací komorou
 (c) Typ třetí generace pracující s nástřikovým plamenem, dlouhou spalovací komorou 6 - 10 barů a tryskou Lavalova typu.[10]

Podmínky a geometrie vstupu prášku mají výrazný vliv na stupeň jeho protavení a tudíž i na kvalitu výsledného povlaku – hlavně na míru porezity a obsah oxidů ve struktuře.

Teplota a rychlost proudu plazmatu závisí zejména na konstrukci hořáku, energetickém příkonu a použitém plynu. Obvykle se při plazmatickém nástřiku používá argon s příměsí dalšího entalpii zvyšujícího plynu. Argon sám tvoří pouze

nízkoenergetické plazma. Proto se používá ve směsi s heliem (20-50 objemových % He) nebo s vodíkem (5-15 objemových % H₂). Jedním z nejteplejších plazmových plynů je dusík, avšak jeho použití je omezeno jeho vysokou reaktivností s většinou přídavných materiálů. [4]

Výsledná rychlost jednotlivých částic prášku je dána rychlostí nosného plynu, tzn. kombinací průtoku nosného plynu a průměru přívodních trysek. Rychlost částice prášku spolu s její hmotností a úhlem, pod kterým vstupuje do proudu plazmatu, pak definuje výslednou trajektorii částice. Na obrázku 7 je schematicky znázorněno rozložení možných trajektorií částic prášku v proudu plazmatu.



Obr. č. 7. Rozložení možných trajektorií částic prášku v proudu plazmatu. [4]

Legenda:

- Původní prášek
- × Běžná trajektorie – dobře protavená částice, téměř optimální velikost
- Ideální trajektorie – dobře protavená částice, ideální velikost
- Trajektorie prochází plamenem – nenatavená, příliš velká nebo těžká částice
- Periferní trajektorie – příliš malá a lehká částice

Malé a lehké částice nemají naštěstí obvykle dostatečný moment hybnosti ($m \times v$), aby pronikly do středové, nejteplejší části proudu plazmatu, kde by pravděpodobně došlo

k jejich přehřátí a degradaci. Větší částice s vyšší hmotností, které pro správné natavení potřebují delší čas a vyšší teplotu, mají naopak dostatečnou energii k proniknutí do středu plazmového proudu. Na druhou stranu, příliš velká rychlost nosného plynu může vést k tomu, že zvláště velké nebo těžké částice (např. W nebo Mo) proniknou až na druhou stranu proudu plazmatu do oblasti s nižšími teplotami, což může vést k nárůstu podílu špatně natavených částic ve struktuře povlaku a ke snížení depoziční účinnosti.[4]

2.4. Používané typy zkoušek nanesených povlaků

- Hodnocení mikrostruktury
- Metalografická příprava
- Zkoušky mechanických vlastností
- Tvrdost a mikrotvrdost
- Pevnost v tahu a adheze
- Modul pružnosti
- Indentace Knoopovým indentorem
- Indentace Vickersovým indentorem
- Vnitřní pnutí
- Odolnost proti šíření trhlin
- Tření a odolnost proti opotřebení
- Hodnocení fyzikálních vlastností

Žárové nástřiky jsou zkoušeny a analyzovány ze dvou základních důvodů: pro vědecko-výzkumné účely a pro kontrolu jakosti povlaků při výrobě. S ohledem na účel hodnocení se liší i metodika zkoušek. Při vědecko-výzkumné práci jsou testované povlaky podrobovány celé řadě různých analýz s cílem získat co největší množství statisticky podložených informací, na rozdíl od hodnocení jakosti vyráběných povlaků, které je časově omezeno a hlavním požadavkem je co nejrychlejší potvrzení standardní kvality povlaku.

Nejjednodušším způsobem kontroly jakosti povlaku je vizuální kontrola povrchu nástřikové součásti. Tak mohou být zachyceny velké defekty typu adhezních porušení, prasklin atd.

Dalším stupněm je kontrola mikrostruktury povlaku pomocí optické mikroskopie. V tomto případě musí být věnována velká pozornost metalografické přípravě zkoumaného vzorku, aby se zamezilo vzniku různých artefaktů po broušení a leštění. Je-li mikrostruktura povlaku hodnocena pro kontrolu jakosti vyráběného povlaku, je nutné zajistit přípravu vzorku za stejných podmínek jako hodnocený díl. Nejvhodnějším způsobem je nástřik vzorku společně s danou součástí.

Mezi pokročilejší metody hodnocení mikrostruktury patří řádkovací elektronová mikroskopie, rentgenová difrakce, transmisní elektronová mikroskopie atd.

Vlastnosti povlaku určují jeho chování v provozu. Nejlepším testem kvality je tedy simulace budoucích reálných podmínek provozu. Tento způsob hodnocení však není obvykle možné provést, a proto jsou povlaky nejčastěji charakterizovány pomocí svých fyzikálních nebo chemických vlastností.

Nejčastěji jsou hodnoceny mechanické vlastnosti povlaků, a to mikrotvrdost, pevnost v tahu, odolnost proti šíření křehkého lomu, modulů pružnosti, houževnatost a odolnost proti opotřebení.

U povlaků, používaných jako teplotní bariéry (TBC povlaky), jsou běžně hodnoceny jejich termofyzikální vlastnosti: tepelná vodivost, charakterizovaná obvykle tepelnou dilatací a hustotou při 300 K, měrné teplo a difusivita. Tato měření bývají doplněna hodnocením odolnosti povlaku proti tepelným šokům.

Elektrické a magnetické vlastnosti povlaků jsou hodnoceny v případě jejich aplikací v elektrotechnickém průmyslu. [9]

3 METODIKA

Metodika mé práce spočívala v ohřevu vzorků na definovanou teplotu, ponechání po minimální dobu nutnou k prohřevu a následném prudkém ochlazení. Takto byl vyvolán tepelný šok, který po překročení určitého počtu opakování může vyvolat praskliny v materiálu TBC, nebo dokonce jeho úplné odloupení od základního materiálu. Jedná se o vzorky o rozměrech cca 2 x 2 cm, jejichž nosnou částí je slitina Inconel 718 (viz. přílohy) a povrch je opatřen TBC povlakem o složení YSZ. Tyto vzorky jsem podrobovala v několika fázích tepelnému šoku. Každá fáze se skládala dle požadavků zadavatele minimálně z 15-ti cyklů, přičemž tento počet byl záměrně při testování překročen a při vyšších počátečních teplotách překročen až dvojnásobně. Pro testování jsem měla k dispozici vyhřívací pec, jejíž maximální možná hodnota ohřevu je 1200 °C a chladicí médium, kterým byla odstátá voda. Zadavatel povoluje použít vodovodní odstátou vodu, jejíž čistota, která je důležitým faktorem při testování a musí být sledována, je zajištěna větším objemem (cca 50 l). Minimální doba ponechání vzorků v peci, která je nutná k jejich prohřevu byla zadavatelem stanovena na 10 minut. Je však možné ji také stanovit na základě výpočtu doby prohřevu (viz. rovnice 1).

Zadavatel žádá o odzkoušení vzorků nejprve při nižší teplotě (700 °C – 850 °C, respektive 800 °C až 950 °C), kde se sice nepředpokládá porušení povlaku, ale sledují se případné morfologické změny. Zvýšená pozornost se věnuje dvěma dalším doporučeným teplotám měření, tj. 900 °C a 1000 °C, přičemž se jedná o minimální teploty experimentu, a maximální mohou být až o 200 °C vyšší. V okamžiku vzniku prvních trhlin se vzorky metalograficky vyhodnotí. Pokud trhliny nevzniknou, experiment pokračuje o dalších 100 % cyklů a pokud ani tehdy nedojde k porušení TBC, experiment se ukončuje s pozitivním výsledkem, a sice, že dané kombinaci TBC + bond cote na materiál Inconel 718 tepelný šok nevadí.

4 PRAKTICKÁ ČÁST – VÝSLEDKY

4.1 Doba ohřevu vzorku

$$\tau_k = \frac{b \cdot \rho \cdot c}{k_1 \cdot \alpha} \cdot \ln \frac{t_{pec} - t_0}{t_{pec} - t_k} \quad [s] \quad (1)$$

Kde:

b určuje rozměr tělesa [m]

k₁ u desky je 1

c je součinitel sálání [W/m².K⁴]

α je součinitel přestupu tepla na povrchu tělesa [W/m².K]

4.2 Návrh metodologie zkoušek a odůvodnění

Zkušební vzorky byly vyrobeny z vysokopevnostní slitiny INCONEL 718 (C 0,08%, Mg 0,35%, P 0,015%, S 0,015%, Cr 17 - 21%, Ni 50 - 55%, Mo 2,8 – 3,3%, Nb 4,75 - 5,5%, Ti 0,65 – 1,15%, Al 0,2 – 0,8%, Co 1%, Ta 0,05%, B 0,06%, Cu 0,3%, Fe 19%). Pevnostní charakteristiky INCONELU 718 jsou uvedeny v tab. 2

Tloušťka materiálu	do 4,75 mm
Pevnost	965 MPa
Mez kluzu	555 MPa

Tabulka č. 2. Pevnostní charakteristiky INCONELU 718. [5]

4.3 Prezentace naměřených výsledků



Graf č. 2. Teplotní závislost na počtu cyklů.

* $100\text{ }^{\circ}\text{C} \div 150\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 700\text{ }^{\circ}\text{C} \div 850\text{ }^{\circ}\text{C}$

$800\text{ }^{\circ}\text{C} \div 950\text{ }^{\circ}\text{C}$

** $150\text{ }^{\circ}\text{C} \div 200\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 900\text{ }^{\circ}\text{C} \div 1050\text{ }^{\circ}\text{C} (1100\text{ }^{\circ}\text{C})$

$1000\text{ }^{\circ}\text{C} \div 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Definice cyklu:

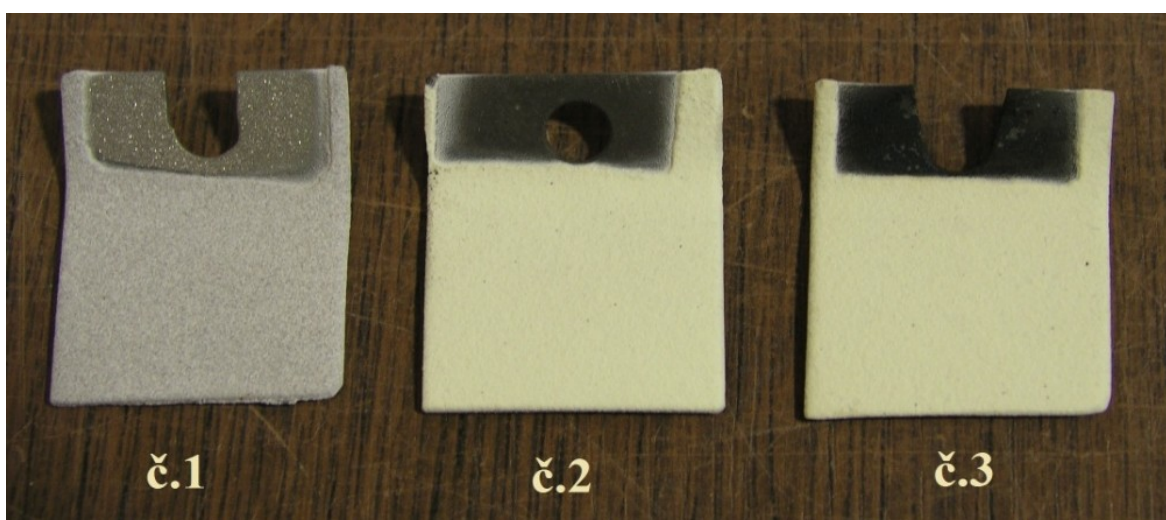
Cyklus- časový úsek, ve kterém byl vzorek vložen do pece, ponechán v ní po dobu minimální nutnou k prohřevu, vytažen a prudce ochlazen chladícím médiem.

5. DISKUZE

V každém experimentu se současně ohřívaly tři vzorky. Důvod byl ten, že v případě porušení jednoho se tento metalograficky vyhodnotí a experiment pokračuje se zbylými.

První experiment začíná na teplotě 700 °C a v průběhu předepsaných 15 -ti cyklů se jeho teplota přibližně lineárně zvýšila až na teplotu 850 °C.

Druhá fáze testování začínala na 800°C a po předepsaném počtu 15. cyklů končila na 950 °C. V průběhu těchto dvou fází se, kromě mírného zabarvení povrchu, nepozorovaly žádné změny ukazující na sníženou kvalitu TBC povlaku. Změnu zabarvení ilustruje obr. 8.

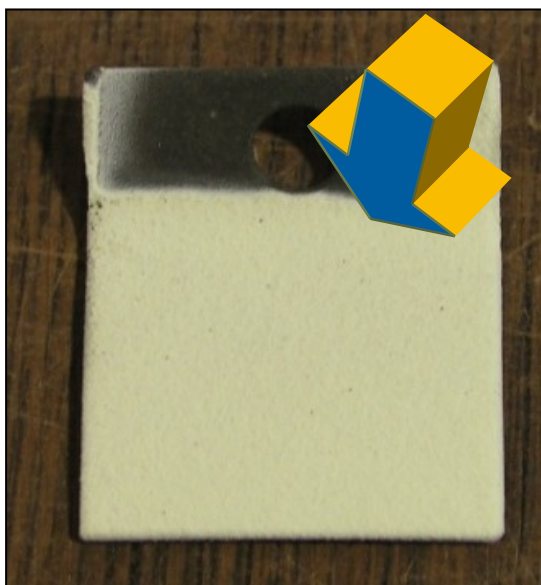


Obr. č. 8. č. 1: Vzorek před prvním cyklem, č. 2: vzorek po prvním cyklu, č. 3: vzorek po pátém cyklu.

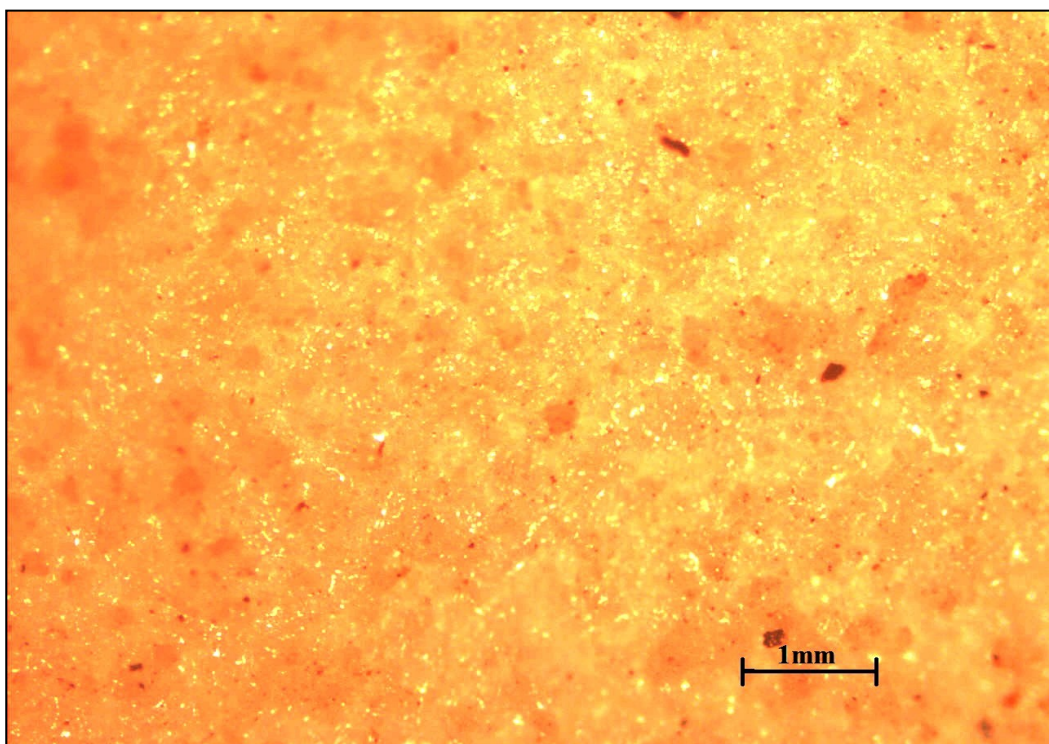
Třetí fáze začínala při 900 °C a po dosažení počtu 15. cyklů se teplota zvýšila na 1000 °C.

Poslední, čtvrtá fáze začínala při 1000 °C a opět po dosažení daného počtu cyklů došlo k navýšení zhruba o 100 °C.

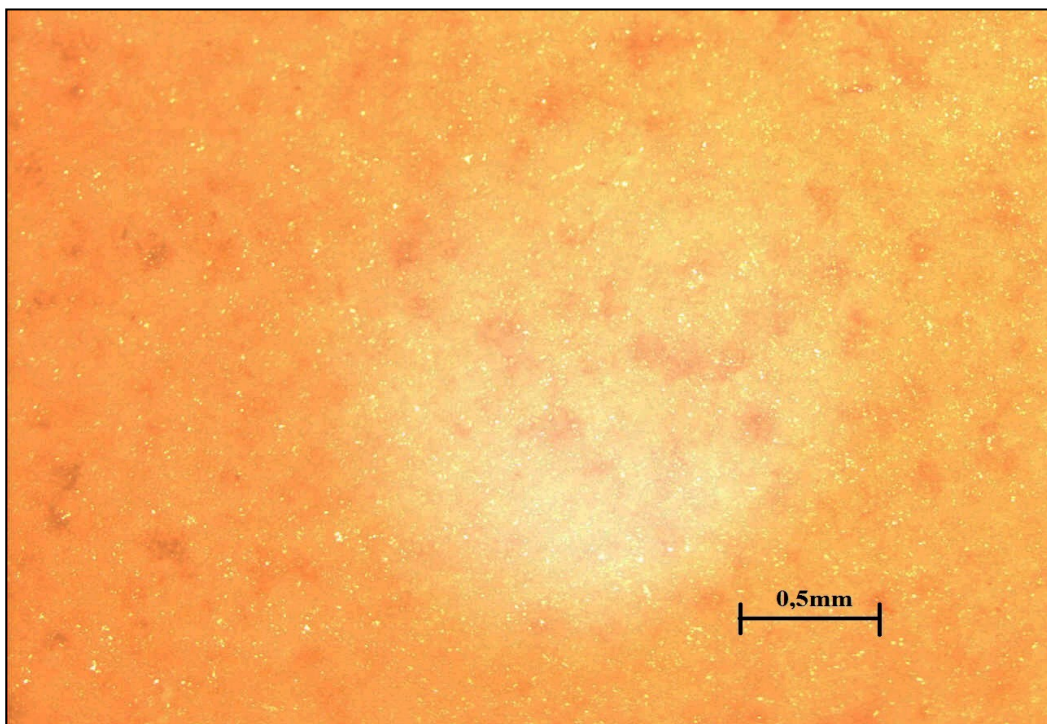
Při třetí a čtvrté sérii měření nedošlo k porušení povlaku po 15. předepsaných cyklech a proto se přikročilo k dalším 15. cyklům. I po této sérii byla kvalita povrchu nástřiku TBC vyhovující, experiment byl ukončen a vzorky metalograficky hodnoceny. Případné trhliny v TBC povlaku by byly viditelné jednak na povrchu TBC (viz. Obr. 7) a jednak v řezu (obr. 9), ty se však nevyskytly.



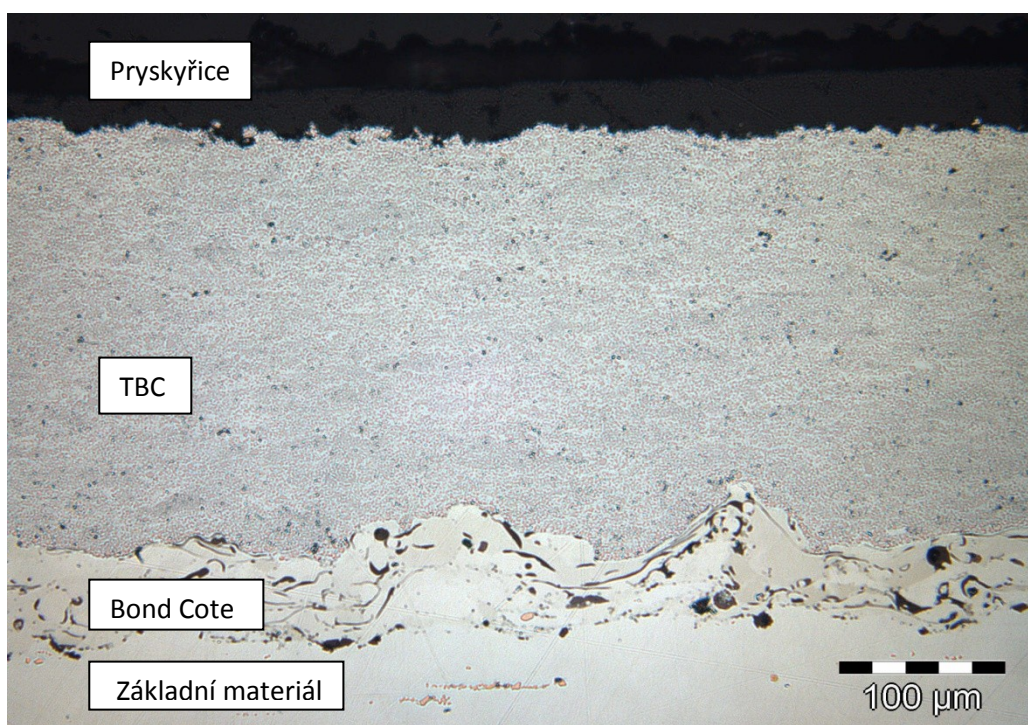
Obr. č. 9. Plocha vzorku se po každém měření hodnotí vizuálně ve směru šipky. Po odměření předepsaného počtu cyklů se v tomto směru provedla fotodokumentace, která je uvedena na následujících obrázcích 9 a 10.



Obr. č. 10. Plocha TBC. Snímek neleptaného vzorku pořízený světelným mikroskopem. Zvětšení 16x. Po 15. cyklu experimentu při teplotě 800 °C.



Obr. č. 11. Plocha TBC. Snímek neleptaného vzorku pořízený světelným mikroskopem.
Zvětšení 25x. Po 15. cyklu experimentu při teplotě 800 °C.



Obr. č. 12. Příčný řez vzorkem. Stav před začátkem experimentu.

6 ZÁVĚR

Experiment potvrdil předpokládanou kvalitu použitých materiálů i zvolené technologie. Po předepsaném počtu 15 -ti ohřevů a ochlazení do vody nedošlo, kromě změny zabarvení TBC povrchu, které jsou podle zadavatele přípustné, k žádným náhlým ani postupným jevům, které by ukazovaly na snižující se kvalitu nástřiku, čímž byla původní hypotéza potvrzena.

7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Svarák.cz* [online]. 2006 [cit. 2011-03-01]. Keramické povlaky stříkané plazmou nebo HVOF. Dostupné z WWW: <<http://www.svarak.cz/c/cz-2/keramicke-povlaky-Strikane-plazmou-nebo-hvof-pouzivane-u-dielektrickych-aplikaci.htm>>
- [2] GERDEMAN, D.A.; HECHT, Norman L. . *Arc plasma technology in materials science*. [s.l.] : Springer-Verlag, 1972. 206 s.
- [3] PŘÍHODA, Miroslav ; HAŠEK, Pavel . *Hutnické pece*. Ostrava : Vysoká škola báňská Ostrava, 1983. 384 s.
- [4] HOUDKOVÁ ŠIMŮNKOVÁ, Šárka; ENŽL, Radek; BLÁHOVÁ, Olga. *Kmm.zcu.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-05-02]. Žárové nástřiky-moderní technologie povrchových úprav. Dostupné z WWW: <www.kmm.zcu.cz>.
- [5] KOLAŘÍK, Kamil; GANEV, Nikolaj; BARCAL, Jaroslav. Analýza zbytkové napjatosti vysokopevnostní slitiny Inconel 718 po elektroerozivním obrábění. In *Xray.cz*. Praha : [s.n.], 2005. s. 102.
- [6] *Asroalloys.com : Thermal spray equipment* [online]. 2009 [cit. 2011-01-03]. Astro Alloys Inc. Dostupné z WWW: <www.asroalloys.com>.
- [7] American Ceramics Society. *Progress in Thermal Barrier Coatings*. London : John Wiley and Sons, 2009. 628 s.
- [8] HOUDKOVÁ, Šárka ; BLÁHOVÁ, Olga; SVITÁKOVÁ, Eva . Indentační lomová houževnatost žárových nástřiků. In *Skodavyzkum.cz* [online]. Plzeň : Skoda vyzkum, 2008 [cit. 2011-06-04]. Dostupné z WWW: <www.skodavyzkum.cz>.
- [9] Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2001, 5, [cit. 2011-06-04]. Dostupný z WWW: <www.mmspektrum.com>.
- [10] HEIMANN, Robert B. *Plasma Spray Coating: Principles and Applications*. [s.l.] : Wiley-VCH, 2008. 427 s.

8 KLÍČOVÁ SLOVA

Plazma, plasmatický nástřik, nízkocyklová teplotní odolnost, keramické povlaky, superslitina, Bond Cote, inconel.

9 SEZNAM ZKRATEK

TBC	Thermal Barrier Coatings
APS	Atmospheric Plasma Spraying
VPS	Vacuum Plasma Spraying
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel
LPSP	Low Pressure Plasma Spraying
Slm	Standard litre perminit
YSZ	Yttria-stabilized zirconia



INCONEL® alloy 718 (UNS N07718/W.Nr. 2.4668) is a high-strength, corrosion-resistant nickel chromium material used at -423° to 1300°F. Typical composition limits are shown in Table 1.

The age-hardenable alloy can be readily fabricated, even into complex parts. Its welding characteristics, especially its resistance to postweld cracking, are outstanding.

The ease and economy with which INCONEL alloy 718 can be fabricated, combined with good tensile, fatigue, creep, and rupture strength, have resulted in its use in a wide range of applications. Examples of these are components for liquid fueled rockets, rings, casings and various formed sheet metal parts for aircraft and land-based gas turbine engines, and cryogenic tankage. It is also used for fasteners and instrumentation parts.

PHYSICAL CONSTANTS AND THERMAL PROPERTIES

Some physical constants of INCONEL alloy 718 are shown in Table 2. Modulus data appear in Tables 3 and 4, and thermal properties in Table 5. The values in these tables will vary slightly, depending on the composition and condition of the specimen tested. They are typical but are not suitable for specification purposes.

Publication Number SMC-045

Copyright © Special Metals Corporation, 2007 (Sept 07)

INCONEL is a trademark of the Special Metals Corporation group of companies.

The data contained in this publication is for informational purposes only and may be revised at any time without prior notice. The data is believed to be accurate and reliable, but Special Metals makes no representation or warranty of any kind (express or implied) and assumes no liability with respect to the accuracy or completeness of the information contained herein. Although the data is believed to be representative of the product, the actual characteristics or performance of the product may vary from what is shown in this publication. Nothing contained in this publication should be construed as guaranteeing the product for a particular use or application.

Table 1 - Limiting Chemical Composition*, %

Nickel (plus Cobalt).....	50.00-55.00
Chromium.....	17.00-21.00
Iron	Balance*
Niobium (plus Tantalum).....	4.75-5.50
Molybdenum	2.80-3.30
Titanium.....	0.65-1.15
Aluminum	0.20-0.80
Cobalt.....	1.00 max.
Carbon.....	0.08 max.
Manganese	0.35 max.
Silicon.....	0.35 max.
Phosphorus.....	0.015 max.
Sulfur.....	0.015 max.
Boron.....	0.006 max.
Copper.....	0.30 max.

*Conforms to AMS specifications

*Reference to the 'balance' of a composition does not guarantee this is exclusively of the element mentioned but that it predominates and others are present only in minimal quantities.

Table 2 - Physical Constants

Density, lb/in ³	
Annealed.....	0.296
Annealed and Aged.....	0.297
Melting Range, °F.....	2300-2437
°C.....	1260-1336
Specific Heat at 70°F, Btu/lb °F (at 21°C, J/kg °C).....	0.104 (435)
Curie Temperature, °F (°C)	
Annealed Material.....	<-320 (<-196)
Annealed and Aged Material.....	-170 (-112)
Permeability at 200 oersteds and 70°F	
Annealed Material.....	1.0013
Annealed and Aged Material.....	1.0011

Table 3 - Modulus of Elasticity at Low Temperatures*

Temperature, °F	Modulus of Elasticity, ksi x 10 ³		Poisson's Ratio
	Young's Modulus	Torsional Modulus	
-308	31.3	12.5	0.25
-86	30.6	11.8	0.30
70	29.0	11.6	0.29
100	29.8	11.5	0.30
200	29.4	11.3	0.31
300	28.8	11.1	0.30
400	28.5	10.9	0.31
500	28.0	10.6	0.32

*Cold-rolled sheet heat-treated in accordance with AMS 5596B.

INCONEL® alloy 718

